

再処理施設の回転機器の診断技術に関する開発研究

著者	馬渡 慎吾
号	56
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第4520号
URL	http://hdl.handle.net/10097/61437

	まわたり しんご
氏 名	馬 渡 慎 吾
授 与 学 位	博士（工学）
学 位 授 与 年 月 日	平成 23 年 9 月 14 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）量子エネルギー工学専攻
学 位 論 文 題 目	再処理施設の回転機器の診断技術に関する開発研究
指 導 教 員	東北大学教授 橋爪 秀利
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 橋爪 秀利 東北大学教授 石井 慶造 東北大学教授 高木 敏行 東北大学准教授 遊佐 訓孝 東北大学准教授 金 聖潤 東北大学准教授 人見 啓太郎

論 文 内 容 要 旨

使用済み核燃料再処理施設における保全の目的は、安全確保を最優先とし、経済的かつ安定的な生産を継続することである。目的を達成する手段の一つとして、国内外の先行原子力施設や一般産業界での保全実績や経験を基に、予防保全に分類される状態基準保全の導入が進められている。状態基準保全とは、構築物、系統及び機器の状態に基づき保全の時期と内容を計画し、実施する保全方式である。再処理施設の主要工程では、液体・気体・粉末の移送や混合、攪拌など、あらゆる用途で回転機器が用いられる。回転機器に対する効果的かつ効率的な状態基準保全を行うためには、機器の状態、すなわち劣化を定量的に検知し、点検時期を事前に予測できる設備診断技術が必要とされる。

回転機器を対象とした設備診断技術の特徴は、転がり軸受部から振動や温度などの設備の運転に付随的に発生し、性能劣化よりも早期に現れる 2 次効果パラメータを用い、判定基準による点検実施の可否を決定することである。しかしながら、2 次効果パラメータは、転がり軸受の劣化と相関関係があるものの、設備の設置条件や運転条件等の影響を受ける。このため、信頼性の高い判定基準を得るためには、分解点検を行い、転がり軸受等の劣化状態を実際に確認し、劣化との相関が取れた最適化を行わなければならない。さらに、再処理施設の一部の特有機器は、放射性物質に汚染されており、そのまま遮へい容器ごと交換されるため、劣化状態の確認を意図した分解点検自体ができず、判定基準の最適化が困難である。これらの課題解決のために、2 次効果パラメータから転がり軸受の劣化そのものを類推する技術が必要とされている。

そこで、本研究では、回転機器の機械要素から生じる振動現象を検知し、劣化の起点から末期までの検知に優位性を有する振動診断と、磁場を応用し振動と電磁氣的挙動の二つの現象を検知可能な新しい診断技術である電磁診断を用い、転がり軸受の主要な劣化モードである外輪・内輪の軌道面上の傷に対し、その劣化の定量化、つまり傷のサイジング技術を見出すことで、再処理施設の回転機器における課題の解決のための基礎的な技術開発を図ることとしている。

これらの点を踏まえ、本論文では、転がり軸受の傷のサイジングに関する診断手法の検討（第 2 章）、再処理施設の一般機器における転がり軸受の傷のサイジングに関する基礎実験（第 3 章）、再処理施設の一般機器における転がり軸受の劣化進展過程に関する傷のサイジングの検討（第 4 章）、さらに再処

理施設の特有機器における転がり軸受の傷のサイジングに関する検討（第5章）を行った。

第1章は序論であり、本研究の背景として、再処理施設における安全性の向上と生産性の確保の観点で重要視される状態基準保全による保全合理化の概要を述べるとともに、再処理施設の回転機器への適用にあたって、その課題と転がり軸受の傷のサイジング手法の必要性について述べる。

第2章では、転がり軸受に関する基本的な特性、本研究で用いた振動診断と電磁診断の原理、及びその信号処理手法から、転がり軸受の傷のサイジング手法を検討した。振動診断は、圧電素子等からなる振動センサを転がり軸受の近傍のケーシングに設置し、回転運動に伴って生じる振動現象を電気信号に変換し、劣化の状態量として評価する。また、電磁診断は、永久磁石とピックアップコイルからなる電磁センサを振動センサ同様に設置し、永久磁石からの静磁場を横切る転動体や振動するケーシングに渦電流が生じ、その渦電流からの応答磁場をピックアップコイルで検知することで電気信号に変換し、劣化の状態量として評価するものである。これらの診断技術の測定対象となる転がり軸受の基本特性として、内輪・外輪の転動面上に傷を有する場合、一定間隔で配置された転動体が公転運動により一定の周期で傷を通過することである。そのため、転動体が傷へ進入してから傷を通過するまでの挙動の変化やその際に生じる振動現象などの2次効果パラメータの定性的な経時変化を診断技術にて検知することで、一定速度で公転する転動体の公転速度から、傷をサイジングできる仮説を立てた。さらに、2つの診断技術で取得した信号を振動診断で用いられる信号処理手法を基に、ノイズの除去と傷に起因する信号の抽出を行い、その分析から傷をサイジングする手法を構築した。

第3章では、第2章で立てた傷のサイジングに仮説を検証するため、再処理施設の一般的な仕様条件に該当する回転機器を対象とし、人工的に傷を施した転がり軸受を用いて、振動診断、及び電磁診断による傷のサイジングに関する基礎実験を行った。再処理施設の一般的な仕様条件は、炭素鋼等の磁性体からなる横型回転機器に、転がり軸受の一種である玉軸受を用いるものとする。傷の模擬について、転がり軸受の内輪、外輪の転動面上にそれぞれ3種類のフレーキングを想定したスリット状の傷を付与することで異常を模擬している。

実験結果より、振動診断、電磁診断で取得した時系列信号から、転動体が外輪傷、内輪傷を通過に伴う周期的な衝撃波形の発生を観察することができ、検知特性がほぼ同等であることがわかった。これは、電磁センサと測定対象物間の材質が高透磁率の炭素鋼であるため、電磁センサで取得される信号が浸透深さの関係から振動起因の信号が主体的になるためである。また、測定データの周波数分析結果より、ノイズを有し、傷の固有周波数の特定が困難である。そのため、傷幅の大きさに応じて変化する周波数帯域をフィルタ処理にて抽出し、絶対値化とローパスフィルタ処理にて高周波成分からなる衝撃波形をその発生間隔に応じた低周波成分に変換するエンベロープ処理を行うことで、傷の固有周波数の特定を明瞭化し、さらには傷に起因する信号を抽出した。この抽出した時系列信号を分析すると、転動体が傷の通過に伴い、傷への進入時、及び退出時に周期的な衝撃波形を生じていることを確認した。その特徴的な傾向から、衝撃波形のピーク間距離を求め、転動体の公転速度を乗じることにより、傷幅を算出した。さらに、ピーク間距離の取得にあたって、ノイズ除去と傷入出時の衝撃波形の鮮明化のため、自己相関を用いた。これら一連の手法から得た傷幅の推定値（括弧内は実測値）は、内輪・外輪傷 0.4mm の

結果が検出不可であったものの、内輪傷 1.9mm (2.1mm)、3.5mm (3.8mm)、外輪傷 1.9mm (2.1mm)、3.7mm (3.7mm) の結果を得ており、第 2 章で立てた傷の通過時の転動体の挙動、もしくは二次効果パラメータの定性的な変動より傷をサイジングする仮説が妥当であることを示した。また、傷に起因する周波数帯の抽出に影響するフィルタ処理の設定周波数は、転がり軸受の形状や寸法、材質、また運転条件等の多様な条件を考慮する必要があるため、適用の初段階では、周波数分析により傷に起因して変化する周波数帯域を観察すべきと結論した。

第 4 章では、第 3 章で構築した自己相関による傷の入出時の時間差から傷をサイジングする手法を用い、転がり軸受の劣化加速試験装置による傷の発生から傷が進展していく過程を検知するため、振動診断、及び電磁診断により傷のサイジングに関する実験を行った。劣化加速試験装置により、試験軸受の動定格荷重を超える高荷重で与えることで初期損傷（剥離）を生じさせ、その後荷重を下げた運転を再開し、振動加速度値が 5G に達した時点で実験終了とした。初期損傷後の荷重条件を変化（6 通り）させ、異なる傷の進展過程を検知する実験を行った。

実験結果より、いずれの荷重条件において傷が生成した際に、検出信号の実効値（RMS）が急激に上昇し、一度運転停止した後、分解し内部の状態を観察すると外輪上にスポット傷が確認された。その後、荷重条件を変えて続けて運転することで傷が大きく進展していく傾向を確認できた。

振動診断、電磁診断にて取得した信号から周波数分析を行うことで、外輪傷の固有周波数が明瞭に確認できている。その結果を基に、自己相関による傷の入出時の時間差から求める傷のサイジング手法を適用したところ、転動体間距離の半分程度までは適用可能であるが、それ以降については、傷幅を特定することが困難であった。そのため、その補完手法として、検出信号の RMS が経時的に極大、極小を示しながら増加する特徴から、転動体間距離と傷幅が一致した場合、常に傷中に転動体が位置することで、それ以外の転動体に対する応力分布が安定する、つまり RMS が極小値を示すと想定した仮説を立てた。RMS の変化からサイジングを行う仮説の検証を行ったところ、傷の劣化進展曲線における自己相関による推定値と実測値の分布に対し、おおよそ整合が取れていた。また、分解による計測結果との比較からも仮説の妥当性を確認した。そのため、自己相関による傷のサイジング手法と RMS の変化による傷のサイジングの 2 つの手法を組み合わせることで、再処理施設の一般機器の条件に対する傷のサイジングが可能であると結論した。

第 5 章では、自己相関による傷のサイジング手法と RMS の変化による傷のサイジングの 2 つの手法を用いて、さらに再処理特有機器へ適用することを目指し、実験的検討を行った。再処理特有機器の特徴は、耐酸性、耐放射線性の観点でステンレス材を用い、メンテナンス性を考慮した縦型回転機器である。

実験結果より、電磁診断で取得した信号は、振動診断と比較して、ノイズが少ない正弦波を取得している。これは、電磁センサと測定対象物間が非磁性体のステンレス材であるため、浸透深さの関係から、転動体が静磁場中を通過に伴う電磁氣的挙動から得られる信号が主体的になるためである。自己相関による傷のサイジング手法を適用したところ、傷の固有周期毎にピークが現れていることで、傷の特定が可能であるものの、傷の入出時の衝撃波形が検出できなかったことで、傷のサイジングが困難であることが確認された。その理由として、縦型回転機器が転がり軸受の転動体全体で荷重を受けることで、均

一に荷重が分散し、転動体1つに対する荷重が小さいことで、傷の通過時の衝撃波形が得にくいためと推定される。そのため、機器の型式による影響、つまり、転動体に及ぼす荷重条件に対し、本手法の適用の際に考慮すべき事項と結論した。

以上、総括すると、本研究では、再処理施設の回転機器を対象とした転がり軸受の傷のサイジング手法を開発した。この手法を再処理施設に適用することで、点検の可否を判定基準の信頼性を向上させることができ、また、状態基準保全の最適化により、再処理施設の安全向上と生産性確保に結び付ける基盤技術として重要である。また、再処理施設同様の課題を有する一般産業や原子力施設等における応用技術としても広範な適用が期待できる。

論文審査結果の要旨

使用済み核燃料再処理施設における回転機器を対象とした診断技術の特徴は、一般の回転機器の診断と大きく異なり、放射性物質に汚染されている環境下で使用されるため遮へい容器ごと交換されることから、劣化状態の確認を意図した分解点検自体ができず、判定基準の最適化が困難であるという点にある。そこで、本論文では、従来の振動診断と、磁場を応用し振動と電磁氣的挙動の二つの現象を検知可能な新しい診断技術である電磁診断を併用し、転がり軸受の主要な劣化モードである外輪・内輪の軌道面上の傷に対し、傷の検出とサイジング技術を見出すことで、再処理施設の回転機器における課題の解決のための基礎的な技術開発を行っている。

第1章は序論であり、本研究の背景として、再処理施設における安全性の向上と生産性の確保の観点で重要視される状態基準保全による保全合理化の概要を述べている。

第2章では、転がり軸受に関する基本的な特性、振動診断と電磁診断の原理、及びその転がり軸受の傷のサイジング手法を検討している。

第3章・第4章では、第2章のサイジングの仮説を検証するため、人工的に傷を施した転がり軸受を用いて、振動診断、及び電磁診断による傷のサイジングに関する基礎実験を行っている。すなわち、自己相関による傷の入出時の時間差から傷をサイジングする手法が有効であること、いずれの荷重条件において傷が生成した際に、検出信号の実効値（RMS）が急激に上昇し、一度運転停止した後、分解し内部の状態を観察すると外輪上にスポット傷が確認され、その後、荷重条件を変えて続けて運転することで傷が大きく進展していく傾向を確認できた。

第5章では、自己相関による傷のサイジング手法を再処理特有機器へ診断に適用した結果、電磁診断で取得した信号は、振動診断と比較してノイズが少ない正弦波が得られ傷の検出が容易であること、傷のサイジングに関しては、縦型回転機器が転がり軸受の転動体全体で荷重を受けることで、均一に荷重が分散することで、傷の入出時の衝撃波形が検出できないことが示された。

以上を総括すると、本論文では、再処理施設の回転機器を対象とした転がり軸受の傷のサイジング手法の基礎的な開発を進めており、点検の可否を判定基準の信頼性を向上させる基盤技術を確立することができたと言える。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。